

4. Зобнин Б.Б., Вожегов А.В. Мультиагентные системы. Управление сложными технологическими комплексами // LAV, Германия, 2014.

УДК 669.045

**М. В. Иванова, М. Д. Казяев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ПЕЧИ**

### **Аннотация**

*Рассмотрена интенсификация внешнего лучистого теплообмена за счет изменения конструкции рабочего пространства печи, а также зависимость приведенного коэффициента излучения для системы «газ – кладка – металл» от отношения поверхности кладки к поверхности металла, участвующих в теплообмене. Произведен расчет изменения приведенного коэффициента излучения при увеличении отношения поверхности кладки к поверхности металла. На примере реальной печи с шагающим подом для нагрева медных слэбов рассмотрена замена гладкого свода на свод пилообразной конструкции. Приведены параметры рабочего пространства печи при новой и старой конструкции рабочего пространства печи. Также произведен расчет плотности теплового потока с предлагаемой новой пилообразной конструкцией свода. По результатам расчета сделаны выводы о тепловой работе печи.*

**Ключевые слова:** *приведенный коэффициент излучения для системы «газ – кладка – металл»; внешний теплообмен; печь с шагающим подом; степень черноты меди; степень черноты стали; плотность теплового потока; излучение.*

### **Abstract**

*The intensification of the external radiant heat exchange due to the change in the design of the furnace working space is considered, as well as the dependence of the reduced emission factor for the gas-mason-metal system on the ratio of the masonry surface to the metal surface participating in the heat exchange. A calculation is made of the variation of the reduced radiation coefficient with an increase in the ratio of the surface of the masonry to the surface of the metal. On the example of a real furnace with a walking hearth for heating copper slabs, the replacement of a smooth arch on the arch of a sawtooth structure is considered. The parameters of the furnace working space are described with the new and old design of the furnace working space. The heat flux density was also calculated with the proposed new sawtooth design of the arch. Based on the results of the calculations, conclusions were made about the thermal operation of the furnace.*

**Key words:** *the reduced emission factor for the gas-line-metal system; external heat exchange, walking beam furnace; emissivity factor of copper; emissivity factor of steal; heat flux density; radiation.*

Металлургические и машиностроительные заводы в своей структуре имеют большое количество прокатных и кузнечно-прессовых цехов, в которых эксплуатируется огромный парк нагревательных и термических печей, осуществляющих сложные технологии нагрева металлической продукции, как под пластическую деформацию, так и для придания изделиям необходимых физико-механических свойств.

На производство и дальнейшую обработку металла затрачивается большое количество топливно-энергетических ресурсов, для уменьшения которых необходимо совершенствовать технологию получения и обработки металла. В свою очередь, совершенствование технологии тепловой обработки металла невозможно без улучшения конструкции печи. Изменяя отдельные элементы конструкции печи можно влиять на основной заключительный процесс теплообработки – теплообмен.

Совершенствование технологий тепловой обработки металла в нагревательных печах возможно в нескольких направлениях:

1) улучшение способа сжигания топлива. Обычно это направление влияет на усиление конвективного теплообмена из-за увеличения скорости движения продуктов горения в рабочем пространстве печи;

2) замена футеровки позволяет снизить теплопотери в окружающее пространство и увеличить коэффициент использования теплоты.

Данная научно-исследовательская работа посвящена изучению интенсификации внешнего лучистого теплообмена от футеровки печи к поверхности металла.

Тепловая работа печи базируется на трех основных факторах:

1) сжигание топлива, т.е. превращение химической энергии топлива в теплоту, носителями которой являются продукты горения – дымовые (или печные) газы;

2) движение печных газов, с помощью которого теплота переносится во все зоны рабочего пространства;

3) теплопередача, которая включает в себя внешний теплообмен, т.е. передачу теплоты от печных газов излучением и конвекцией на поверхность нагреваемых материалов, и внутренний теплообмен – передачу тепла теплопроводностью от поверхности материала к его середине.

Интенсификация внешнего теплообмена возможна не только за счет повышения температуры в рабочем пространстве, но и за счет изменения конструкции рабочего пространства печи, что приведет к изменению плотности теплового потока в связи с увеличением отношения  $F'_{кл}/F'_m$ . Для увеличения этого отношения необходимо изменить либо расположение заготовок, нагреваемых в печи, либо поверхности различных элементов кладки – свода, пода и боковых стен печи.

Для изучения зависимости плотности теплового потока излучением от отношения  $F'_{кл}/F'_m$  взяты два вида металлов – черный, в виде стали, со степенью черноты равной 0,8 и цветной – медь со степенью черноты 0,55.

При расчете нагрева металла плотность теплового потока при теплообмене излучением находится по формуле [1]:

$$q_{м.л} = C_{з.к.м.} \left[ \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \varphi_{м.ст}, \quad (1)$$

где  $C_{з.к.м.}$  – приведенный коэффициент излучения для системы «газ – кладка – металл»;  $\varphi_{м.ст}$  – угловой коэффициент с металла на футеровку.

Приведенный коэффициент излучения для системы «газ – кладка – металл» определяют по формуле [1]:

$$C_{\text{з.к.м}} = C_0 \frac{\varepsilon_{\text{м}} \cdot \left( 1 + \frac{F'_{\text{кл}}}{F'_{\text{м}}} - \varepsilon_{\text{г}} \right)}{\left[ \varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{м}}) \right] \frac{1 - \varepsilon_{\text{г}}}{\varepsilon_{\text{г}}} + \frac{F'_{\text{кл}}}{F'_{\text{м}}}}, \quad (2)$$

где  $C_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ ;

$\varepsilon_{\text{м}}$  – степень черноты металла;

$\frac{F'_{\text{кл}}}{F'_{\text{м}}}$  – отношение поверхности кладки к поверхности металла, участвующих в

теплообмене;

$\varepsilon_{\text{г}}$  – степень черноты печных газов.

Приводится расчет изменения приведенного коэффициента излучения  $C_{\text{з.к.м}}$  при увеличении отношения  $F'_{\text{кл}}/F'_{\text{м}}$  в пределах от 1 до 3 с шагом 0,5. При расчете принимается, что степень черноты газов неизменна.

При  $\frac{F'_{\text{кл}}}{F'_{\text{м}}} = 1$  по формуле (2) при  $\varepsilon_{\text{м}} = 0,55$  получаем:

$$C_{\text{з.к.м}} = 5,7 \frac{0,55 \cdot (1 + 1 - 0,25)}{[0,55 + 0,25 \cdot (1 - 0,55)] \cdot \frac{1 - 0,25}{0,25} + 1} = 1,84 \frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

Остальные расчеты выполнены аналогично и их результаты приведены в таблице 1 и в виде графической зависимости  $C_{\text{з.к.м}} = f\left(\frac{F'_{\text{кл}}}{F'_{\text{м}}}\right)$  при  $\varepsilon_{\text{г}} = \text{const}$ .

Таблица 1

Результаты расчетов  $C_{\text{з.к.м}}$

	$F'_{\text{кл}}/F'_{\text{м}}$	1	1,5	2	2,5	3
$\varepsilon_{\text{м}} = 0,55$	$C_{\text{з.к.м}}, \frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$	1,84	2,02	2,16	2,27	2,36
$\varepsilon_{\text{м}} = 0,8$	$F'_{\text{кл}}/F'_{\text{м}}$	1	1,5	2	2,5	3
	$C_{\text{з.к.м}}, \frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$	2,25	2,53	2,76	2,94	3,08

Зависимость приведенного коэффициента излучения для системы «газ – кладка – металл»  $C_{\text{з.к.м}}$  от изменения отношения  $F'_{\text{кл}}/F'_{\text{м}}$  для различных металлов представлена на рис. 1.

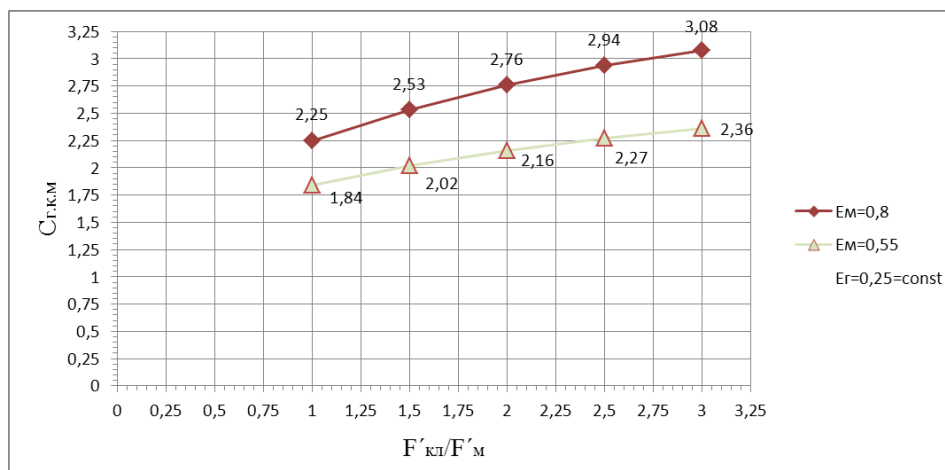


Рис. 1. Зависимость  $C_{г.к.м.}$  от изменения отношения  $F'_{кл}/F'_м$  для различных металлов (сталь и медь)

Более интенсивное увеличение приведенного коэффициента излучения для системы «газ – кладка – металл» происходит при  $\epsilon_m = 0,8$  (37 %) и менее интенсивное при  $\epsilon_m = 0,55$  (28 %).

Но об интенсивности теплообмена излучением необходимо судить, в конечном итоге, по плотности теплового потока  $q_{м.л.}$ , поступающего на металл, которая рассчитывается по формуле (1).

Приведем изменение  $q_{м.л.}$  в зависимости от изменения  $F'_{кл}/F'_м$  для стали и меди. При этом температура газов  $t_2$  принята  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура поверхности металла  $t_n - 950\text{ }^\circ\text{C}$ .

По формуле (1) при  $\frac{F'_{кл}}{F'_м} = 1$  и при  $\epsilon_m = 0,55$  получаем:

$$q_{м.л.} = 1,84 \cdot \left[ \left( \frac{1273}{100} \right)^4 - \left( \frac{1223}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,7 = 5009,15 \text{ Вт/м}^2.$$

Остальные расчеты выполнены аналогично. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов  $q_{м.л.}$

$\epsilon_m = 0,55$	$F'_{кл}/F'_м$	1	1,5	2	2,5	3
	$q_{м.л.}, \text{Вт/м}^2$	5009,15	5499,17	5880,3	6179,76	6424,78
$\epsilon_m = 0,8$	$F'_{кл}/F'_м$	1	1,5	2	2,5	3
	$q_{м.л.}, \text{Вт/м}^2$	6125,32	6887,58	7513,72	8003,75	8384,88

Из результатов расчетов видно, что плотность теплового потока действительно повышается при увеличении отношения  $F'_{кл}/F'_м$ . Для меди плотность теплового потока увеличилась на 28%, для стали – на 37% как и в случае с приведенным коэффициентом излучения для системы «газ – кладка – металл».

В качестве эффективного изменения отношения  $F'_{кл}/F'_м$  предлагается увеличение поверхности свода печи за счет изменения его конструкции путем замены гладкой внутренней поверхности, выполненной из керамоволокнистых блоков на пило-

образную поверхность, выполненную другим способом монтажа тех же самых блоков. Для изучения этого вопроса в качестве исходного варианта принята конструкция печи с шагающим подом для нагрева медных слэбов.

Разработка проекта печи выполнена ООО Научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» для ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов» [2; 3].

Изменение конструкции свода печи показано на рис. 2.

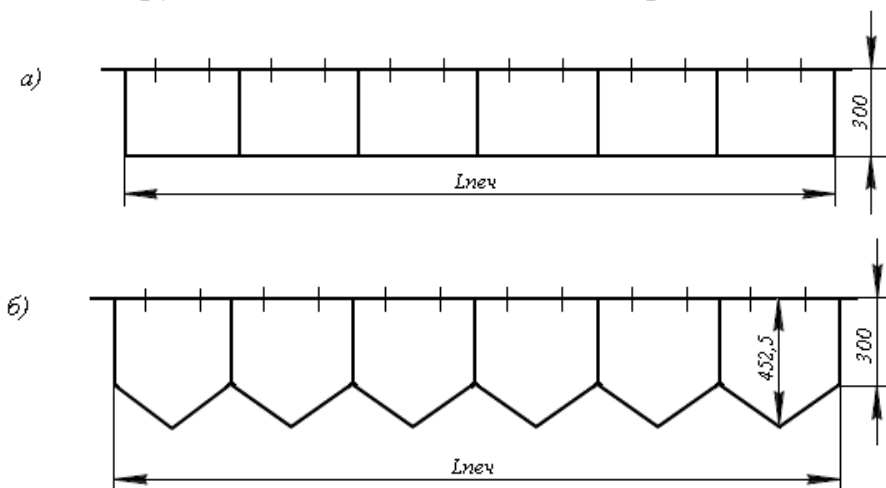


Рис. 2. Схема конструкции свода: гладкий свод (а); пилообразный свод (б)

Расчет плотности теплового потока излучением  $q_{м.л.}$  и приведенного коэффициента излучения  $C_{г.к.м.}$  выполнялся по формулам (1) и (2) соответственно. Температуру газов  $t_g$  приняли 1000 °С, а температуру поверхности металла  $t_n$  – 950 °С. Степень черноты газов приняли равной  $\varepsilon_m = 0,55$ .

Некоторые параметры рабочего пространства печи и результаты расчетов при разных конструкциях свода приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры рабочего пространства печи и ее тепловой работы

Вариант	$L_{печ},$ м	$D_{печ},$ м	$H_{печ},$ м	$F_{св},$ м <sup>2</sup>	$F_{кл},$ м <sup>2</sup>	$F_m,$ м <sup>2</sup>	$F'_{кл}/F'_m$	$C_{г.к.м.},$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )	$q_{м.л.},$ Вт/м <sup>2</sup>
а) гладкий свод	13,91	5,2	0,95	72,332	120,0	83,43	1,438	2	5444,73
б) пилообразный свод	13,91	5,2	1,0	120,29	169,412	83,43	2,03	2,17	5907,53

Для данной нагревательной печи замена гладкого свода на пилообразный дало увеличение площади кладки на 41 %,  $C_{г.к.м.}$  увеличилось на 8,5 %. В результате плотность теплового потока при теплообмене излучением с новой конструкцией свода возросло на 8,5 %. Следовательно, нагрев заготовок в рабочем пространстве печи будет происходить быстрее с использованием меньшего количества топлива.

## Список использованных источников

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учебное пособие для студентов вузов / Б.Ф. Зобин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко, А.С. Телегин, Ю.Г. Ярошенко. Изд. 2-е. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
2. Тепловая работа и конструкция печи с шагающим подом для нагрева медных слябов / М.В. Иванова, М.Д. Казяев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием (11–12 мая 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 47–51.
3. Проходная печь с шагающим подом для нагрева слитков из меди и ее сплавов / Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев [и др.] // Цветные металлы. 2014. №10. С. 83-87.

УДК 519.6

**Ю. А. Каграманов, Е. К. Киктев, В. Г. Тупоногов, А. Ф. Рыжков**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕЙ СУХОЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ ГАЗА

### Аннотация

*Проведен расчет шести вариантов схем реакционного систем горячей сухой сероочистки синтез газа с различными параметрами и характеристиками сорбента, кипящего слоя. Ключевым узлом в теплотехнических приборах является горячая система сухой сероочистки синтез-газа, которая использует синтетические горючие газы как в парогазовой установке с внутри цикловой газификацией твердого топлива. В вариантах схем использован пузырьковый кипящий слой различной высоты и циркуляционный кипящий слой с различными диаметрами частиц и температурами в слое. Поток неочищенного синтез газа поступает в реактор горячей сероочистки, где взаимодействует с частицами потока сорбента, продуктами реакций является очищенный синтез газ и отработанный сорбент. В программе Aspen Plus выполнен расчет вариантов схем и проведен сравнительный анализ результатов расчета. На основе анализа была выбрана наиболее оптимальная схема работы системы сероочистки. Написана собственная программа расчета реактора. Результаты расчета в Aspen и в собственной программе согласуются. Анализы всех вариантов показали, что схемы с ЦКС заметно снижают массовый расход сероводорода на выходе из системы очистки, за счет возможности увеличения циркулирующего сорбента в системе.*

**Ключевые слова:** реакционный блок ГССО, Aspen plus, расчет реактора, газ, сорбент.

### Abstract

*Calculation of six variants of schemes of the reaction system for hot dry desulphurization of gas synthesis with different parameters and characteristics of the sorbent, fluidized bed is carried out. The key node in heat engineering devices is the hot dry desulfurization system of synthesis gas, which uses synthetic combustible gases as in a combined cycle gas turbine with internal cycling gasification of solid fuel. In the variants of the schemes, a bubbling fluid bed of various heights and a circulating fluidized bed with different particle diameters and temperatures in the bed are used. The crude synthesis gas*